

レーザー光で半導体中に超伝導に類似した電子正孔ペア状態をついに実現

1. 発表者

島野 亮（東京大学低温センター／大学院理学系研究科物理学専攻 教授）

室谷 悠太（東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 博士課程3年生）

秋山 英文（東京大学物性研究所 教授）

2. 発表のポイント

- ◆50年以上前に理論予測されていたながらその実現が困難であった、超伝導状態に類似した新たな量子状態である電子正孔BCS状態を、レーザー光照射により、半導体中に生成することを初めて実証した。
- ◆超伝導のクーパー対のように電子正孔ペアが結晶中を摩擦なく動くことによる、摩擦のないエネルギーの流れが実際に起きるかどうかの検証が期待される。
- ◆このような量子状態は今後多くの物質で現れると考えられ、その普遍的な性質や光との相互作用を理解する鍵になることが期待される。

3. 発表概要

東京大学低温センター／大学院理学系研究科物理学専攻の島野亮教授、室谷悠太博士課程大学院生、東京大学物性研究所の秋山英文教授らは、米国プリンストン大学のグループとの共同研究で、半導体中にレーザー光を照射することで、電子と正孔がペアとなった電子正孔BCS状態と呼ばれる新しい量子状態が生成されることを初めて実証しました。実現に必要な条件を整えることの難しさから、理論的な提案以来50年もの間明確な実証がなされずにいましたが、励起子と呼ばれる半導体中の電子状態とレーザー光の強い相互作用を利用することで、これまでとは違ったアプローチからその状態の実現に成功しました。新しい量子状態を実現したことにより、半導体に光を照射した際にできる電子状態の理解が進むだけでなく、さまざまな物質における量子現象をより深く理解する鍵になることが期待されます。

4. 発表内容

(背景)

半導体に適当な波長の光を照射すると、結晶を構成する原子に束縛されていた価電子はエネルギーを得て結晶中を動き回れるようになります。同時に、電子の抜け穴は正の電荷を持った粒子として振る舞うようになり、これは正孔と呼ばれます。電子と正孔は電氣的な力で引き付けあうため、密度が低ければ互いに束縛しあって励起子と呼ばれる電氣的に中性の粒子を作ります。ちょうど、電子と陽子で水素原子ができるようなものです。しかし、密度が高くなると励起子同士はぶつかり合っ

と正孔は自由に結晶中を動くようになります。こうなると、金属の中を自由電子のように、電子と正孔が電流を運び、全体として金属のような性質を示します。通常の半導体レーザーもこのような電子と正孔の自由電子的な振る舞いに基づいて動作しています。ところが、こうした高密度の電子と正孔の集団の温度を下げていくと、イオン化してしまうはずの電子と正孔が再びペアを作り、量子力学的な絶縁体状態になることが理論的に予想されていました。この現象は、金属を冷やすと電子同士がクーパー対（注1）というペアを組んで超伝導状態になると非常によく似ており、違いは電子二個のペアの代わりに電子と正孔のペアができる点です。このため、超伝導の基礎理論である BCS 理論（注2）の名前をとって、電子正孔 BCS 状態と呼ばれています。質量のほぼ等しい正と負の電荷を持った粒子の集団は、十分低温ではペアを組んで絶縁体になってしまうというわけです。ところが最初の理論的予測（1965年）から50年余りもの間、電子正孔 BCS 状態の明確な実証はなされていませんでした。この状態を作るためには十分に温度を下げる必要がありますが、光を半導体に照射して電子と正孔をつくと温度が上昇してしまい、低温に到達することが困難だったのです。

（研究内容と成果）

本研究グループはレーザー光の波長を制御して、5 K (-268°C) に冷やした半導体ヒ化ガリウム中に励起子だけの状態を狙い撃ちして生成し、その密度を増やしていくという従来にはない手法でこの問題に取り組みました。そして、レーザー光の強度を上げていくと、励起子の集団に代わって電子正孔 BCS 状態が実現することを明らかにしました（図1）。これはレーザー光が電子と正孔を結び付ける糊の役目を果たし、本来ならイオン化してしまうような高密度領域でもペア形成を促進したためと考えられます。電子正孔 BCS 状態は超伝導と同じような状態ですが、その担い手は電氣的に中性な電子と正孔のペアですので、電荷は運びません。しかし、電子正孔ペアは光子からそのエネルギーを受け取っています。従って、超伝導のクーパー対のように電子正孔ペアが結晶中を摩擦なく動くことができれば、摩擦のないエネルギーの流れが期待できます。このような現象が本当に起きるかどうかについて、長年議論が交わされてきました。現時点ではレーザー光の照射中においてのみ電子正孔 BCS 状態が観測されていますが、物質によってはレーザー光の照射後でも電子正孔 BCS 状態が長続きする可能性があります。その場合は電子正孔ペアが摩擦（散逸）なくエネルギーを運ぶかどうかの検証実験が可能になると考えられます。

（本研究の意義、今後の展望）

半導体中に光を照射してできた電子と正孔の集団は、物性物理学の縮図と言われるほどに多彩な状態を示すと考えられており、今回の発見は低温における電子状態の理解、相図の完成に向けた大きな一歩であると言えます。また、半導体における電子正孔 BCS 状態の概念は、超伝導体や冷却原子気体における BCS-BEC クロスオーバー（注3）や、励起子絶縁

体（注4）と呼ばれる特殊な絶縁体など、近年注目を浴びているさまざまな量子力学に由来する物性物理学のトピックスにも拡張されてきました。レーザー技術を用いて電子正孔BCS状態の実証に成功したことは、半導体の理解を深めるにとどまらず、光との相互作用や上のようなさまざまな現象における普遍的な性質を理解する鍵になると期待されます。なお本研究の一部は、JSPS 科研費 JP15H02102、JP18J13232 の助成を受けて行われました。

5. 発表雑誌

雑誌名

「*Physical Review Letters*」(米国時間 2019 年 11 月 8 日に注目論文としてオンライン掲載予定)

論文タイトル

Light-driven electron-hole Bardeen-Cooper-Schrieffer-like state in bulk GaAs

著者

Yuta Murotani, Changsu Kim, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, and Ryo Shimano

6. 用語解説

注1 クーパー対

超伝導体の中で電流を運ぶもの。電子二個からなり、摩擦なく（エネルギーを損失することなく）動くことができる。

注2 BCS 理論

バーディーン、クーパー、シュリーファーが 1957 年に発表した理論。発見以来 50 年近く謎だった超伝導の機構を解明した。この業績により、三氏は 1972 年のノーベル物理学賞を受賞した。

注3 BCS-BEC クロスオーバー

BCS 理論に登場するクーパー対は弱く束縛された状態だが、仮に束縛が強くなって大きさが小さくなると、近似的にボース粒子として振舞い、低温でボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) すると予想されている。このとき BCS から BEC への移り変わりは連続的に起こると考えられており、BCS-BEC クロスオーバーと呼ばれている。

注4 励起子絶縁体

普通の半導体や絶縁体では電子が格子イオンに束縛されることによって絶縁化しているが、いくつかの金属（半金属）では、電子や正孔がクーロン引力に因って束縛することにより絶縁化することが理論的に予想されており、励起子絶縁体と呼ばれている。これも電子正孔 BCS 状態の一つである。

7. 問い合わせ先：

【研究内容に関すること】

東京大学低温センター／大学院理学系研究科物理学専攻

教授 島野 亮（しまの りょう）

TEL: 03-5841-4181

E-mail: shimano@phys.s.u-tokyo.ac.jp

【報道に関すること】

東京大学低温センター 事務室

TEL : 03-5841-2852

E-mail : email@crc.u-tokyo.ac.jp

東京大学大学院理学系研究科・理学部広報室

TEL : 03-5841-8856

E-mail : kouhou.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp

東京大学物性研究所 広報室

TEL : 04-7136-3207

E-mail : press@issp.u-tokyo.ac.jp

8. 添付資料:

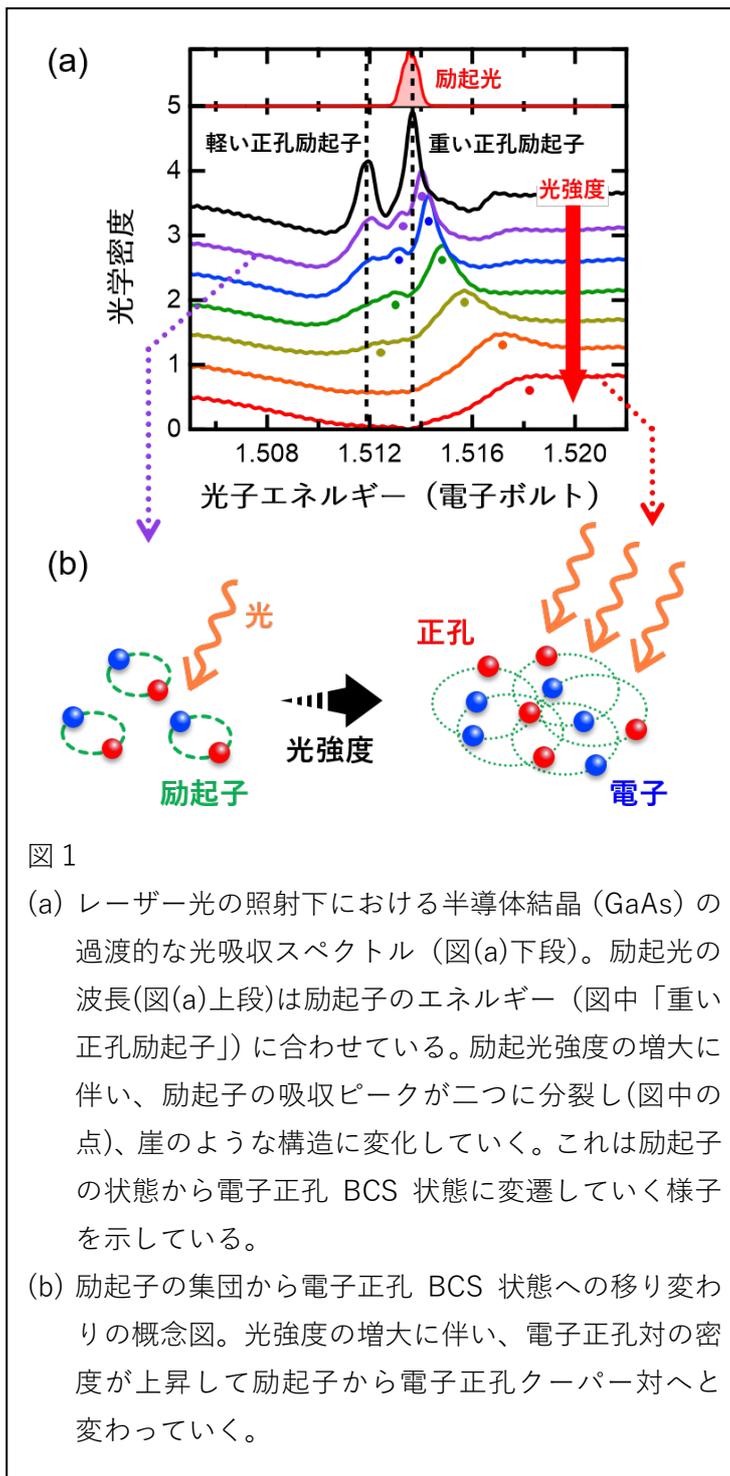


図 1

- (a) レーザー光の照射下における半導体結晶 (GaAs) の過渡的な光吸収スペクトル (図(a)下段)。励起光の波長(図(a)上段)は励起子のエネルギー (図中「重い正孔励起子」) に合わせている。励起光強度の増大に伴い、励起子の吸収ピークが二つに分裂し(図中の点)、崖のような構造に変化していく。これは励起子の状態から電子正孔 BCS 状態に変遷していく様子を示している。
- (b) 励起子の集団から電子正孔 BCS 状態への移り変わりの概念図。光強度の増大に伴い、電子正孔対の密度が上昇して励起子から電子正孔クーパー対へと変わっていく。